1.3 광전효과

20세기에 접어들면서 빛을 금속표면에 쪼이면 금속표면에서 전자가 방출되는 현상이 발견되었으니 이를 광전효과(photoelectric effect)라고 한다. 이 경우, 쪼여진 빛의 파장에 따라 전자가 방출되거나 전혀 방출되지 않거나 하였으며, 방출유무는 빛의 세기와는 무관하였다. 다만 전자가 방출될 경우, 방출되는 전자의 개수는 빛의 세기에 비례하였고, 방출전자의 에너지는 쪼여진 빛의 파장에 따라 달라졌다. 즉, 어떤 금속표면에 노란색을 쪼이면 아무리 강한 빛을 쪼여도 반응이 전혀 없다가 파란색을 쪼이면 굉장히 약한 빛을 쪼여도 전자가 방출되는 식이었다. 그리고 방출되는 전자의 수는 빛의 세기가 강해지면 더 많아졌고, 예컨대 파란색에서 보라색으로 쪼이는 빛의 파장을 짧게 해주면 방출되는 개별 전자의 운동에너지가 더 커졌다.

고전물리학적으로는 빛의 세기에 따라 전자의 에너지가 증감할 것으로 예측되었으나 이미 언급한 바와 같이 실험 측정 자료는 그렇지 않음을 보여주었다. 앞서 살펴본 플랑크의 양자가설은 흑체복사 측정 자료를 맞추기 위하여 만들어졌으나, 아무도 그 이유를 설명하지는 못하였다. 이후, 1905년 아인슈타인은 플랑크의 양자가설을 받아들여 광전효과를 다음과 같이 설명하였다. 빛은 알갱이들로 이루어졌고 빛 알갱이의 에너지는 플랑크의 양자가설에서 가정한 기본 에너지 뭉치인 $h\nu$ 값을 갖는다고 가정하였다. 이러한 빛의 알갱이를 광자(photon)라고 하며, 광자의 개수는 빛의 세기에 비례한다. 때문에 빛의 알갱이가 금속내의 자유전자와 부딪혀서 흡수되면 전자를 금속에 묶어두는 속박에너지(이를 금속의 일함수(work function)라고 한다)보다 흡수된 광자의 에너지가 클 경우 전자는 다음과 같은 운동에너지를 가지고 금속으로부터 튀어나오게 된다.

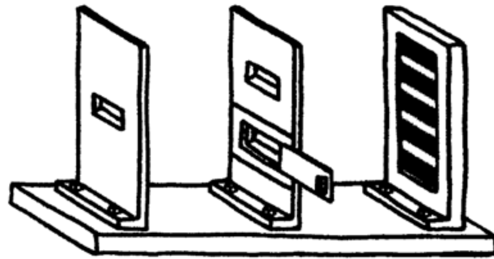
$K.E. = h\nu - \Phi, \qquad \Phi$: 일함수.

때문에 빛의 진동수 ν 가 충분히 커서 광자의 에너지 $h\nu$ 가 일함수 Φ 보다 커질 경우 전자는 방출되게 된다. 광자의 개수는 쪼여준 빛의 세기에 비례하므로 방출되는 전자의 개수 역시 쪼여준 빛의 세기에 따라 변하게 된다. 한편, 빛의 진동수가 작아서 광자의 에너지가 일함수보다 작을 경우에는 광자를 흡수하더라도 전자가 금속 밖으로 나갈 수 없어 방출은 실현되지 않는다. 이러한 가정으로 광전효과는 완벽하게 설명되었으며, 이는 이때까지 파동으로만 여겨왔던 빛이 입자임을 말해주는 것이다.

아인슈타인은 1922년 광전효과로 노벨상을 받았으나 그때까지도 대다수 물리학자들은 여전히 빛이 광자라는 개념에 대해 탐탁치 않게 생각하였다. 예컨대 밀리칸(R. Millikan)은 모든 면에서 아인슈타인의 광전효과 공식과 완벽하게 들어맞는 실험결과들을 1915년에 확인하였으나 여전히 “아인슈타인의 광자 ‘가설’은 전적으로 유지될 수 없으며 무모한 가정”이라고 평하였다. 빛이 광자라는 개념은 1923년 콤프턴(A. Compton)의 실험에 의하여 비로소 완전한 인정을 받게 되었는데, 그는 빛이 전자와 부딪혀 진로를 바꿀 때 빛의 진동수가 변하는 현상을 발견하였다. 이는 전혀 예상할 수 없었던 결과로 통상 파동이 물체에 부딪혀 반사되거나 진로를 바꿀 때 진동수가 변하지 않는 것과 배치되었다. 반면에 콤프턴의 실험결과는 빛이 에너지가 $h\nu$ 로 주어지는 입자(광자)로서 전자와 충돌하였을 때를 가정한 결과와 완벽하게 일치하였다. 이로서 빛이 광자라는 개념을 둘러싼 논란은 모두 가라앉게 되었다.

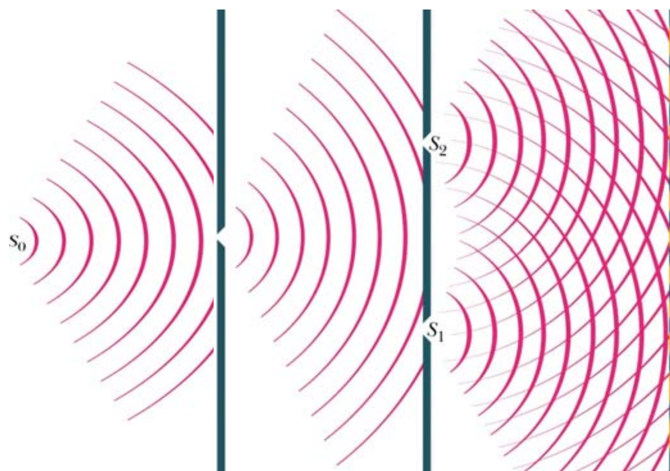
► 빛의 파동성 - 영의 이중 슬릿 간섭실험 ◄

광전효과에 대한 아인슈타인의 광자 가설 이전까지 빛은 파동으로만 여겨졌었는데 빛이 파동인지 입자인지 그 정체성에 대해서는 이미 17세기 뉴톤 당시에도 논쟁거리였다. 당시, 뉴톤은 빛의 입자성을 주장하였고, 라이브니쯔(G. W. Leibniz)는 빛의 파동설을 주장하였는데, 이러한 논쟁을 잠재운 것은 영국의 의사인 영(T. Young)이 1802년 행한 이중 슬릿을 사용한 간섭실험이었다([그림2] 참조).



[그림2] 영의 이중 슬릿 간섭실험 (보어의 그림 발췌)

빛은 한 개의 슬릿을 통해 들어온 후 두 개의 슬릿(이중 슬릿)을 통과하여 스크린에 도달한다. 여기서 이중 슬릿의 한 슬릿은 열고 닫을 수 있게 되어 있다. 이중 슬릿을 모두 열어 놓으면 스크린에는 밝은 줄과 어두운 줄이 교대로 나타난다. 만약 이중 슬릿에서 아래 슬릿을 막고 위 슬릿만 열었을 경우에는 넓고 밝은 줄 하나가 두 슬릿 사이의 중간 지점에 해당하는 위치로부터 조금 위로 치우쳐서 나타난다. 만약 아래 슬릿을 열고 위 슬릿을 막고 할 경우는 그 반대로 밝은 줄이 나타난다. 여기서 두 슬릿을 모두 열고 관찰하면 위나 아래에 나타난 밝은 부분의 특정 부분 중에서 밝아지지 않고 오히려 어둡게 나타나는 부분이 생겨난다. 즉, 밝은 줄과 어두운 줄이 교대로 나타난다. 이렇게 밝은 줄과 어두운 줄이 교대로 나타나는 것을 우리는 간섭(interference) 현상이라고 한다. 빛이 만약 입자라면 이중 슬릿의 두 슬릿에 의하여 생긴 각각의 밝은 줄은 합해져서 두 밝은 줄의 어느 부분을 보던 간에 조금씩은 더 밝아지게 되고 밝았던 부분이 어두워지는 일은 결코 없을 것이다.



[그림3] 물결파의 간섭 현상

한편, 이러한 간섭현상은 빛이 파동이라면 가능하다. 예컨대 연못에 돌을 던지면 물표면의 물결 파동이 동심원으로 퍼져나간다. 만약 여기에 구멍이 하나 뚫린 막과 두개 뚫린 막을 차례로 설치하고, 그 다음에 스크린에 해당하는 막을 설치하면 그 막의 각 위치에서 파동의 크기에 해당하는 물결의 높이를 측정하면 파동이 서로 상쇄되거나 보강되어 물결의 크기가 높은 점과 낮은 점들이 번갈아 나타난다([그림3] 참조). 즉, 영의 이중 슬릿에 실험에서와 같은 간섭현상이 나타난다. 그러므로 우리는 영의 이중 슬릿 실험을 통하여 빛이 파동임을 알 수 있다. 영의 실험 이후 물리학자들은 빛의 파동이론을 더욱 발전시켰으며, 다양한 광학적 현상들을 설명할 수 있었다. 1860년대에 맥스웰은 전기와 자기 이론을 통합한 전자기이론을 완성하여 빛이 전자기파임을 이끌어냈다. 즉, 맥스웰은 자신의 전자기 파동방정식에서 그 파동의 속도가 빛의 속도와 같음을 보였다. 그리고 얼마 후 헤르츠(H. Hertz)는 빛이 전자기파임을 실험적으로 입증하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 광전효과 현상이나 콤프턴의 실험은 빛의 입자성을, 영의 간섭실험은 빛의 파동성을 의심의 여지없이 보여주고 있다. 즉, 상식적인 관점에서 생각할 때 서로 상반되는 특성을 빛이 함께 가지고 있음을 이 실험들은 보여주고 있는 것이다. 때문에, 이러한 서로 상반되는 듯한 자연현상들을 있는 그대로 우리는 인정하여야 하며, 이를 함께 포괄하는 새로운 이론체계의 당위성이 대두되는 것이다.
